

ОТЗЫВ

официального оппонента Наумова Дмитрия Вадимовича на диссертацию
Жежер Яны Валерьевны

«Исследование массового состава космических лучей и поиск нейтрино ультравысоких энергий по данным эксперимента Telescope Array»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Тема диссертационной работы связана с изучением состава космических лучей ультравысоких энергий. Несмотря на то, что история изучения космического излучения насчитывает уже более ста лет, многие вопросы до сих пор не имеют общепринятых ответов. Например, не определены источники и процессы, в которых рождаются космические лучи ультравысоких энергий, механизмы их ускорения и физические условия среды, в которых они распространяются.

Диссертационная работа Жежер Я.В. посвящена вопросам определения массового состава космических лучей и поиска в них нейтрино. Таким образом, тема работы, на мой взгляд, **актуальна**.

В работе были определены **цели**:

1. вычисление средней атомной массы космических лучей в диапазоне энергий 10^{18} - 10^{20} эВ по данным Telescope Array.
2. Вычисление доли протонов по отношению к гелию в потоке КЛ в диапазонах энергий 10^{18} эВ $< E < 10^{18.5}$ эВ и $10^{18.3}$ эВ $< E < 10^{19.3}$ эВ с использованием значений экспоненциальной ширины распада, измеренной обсерваторией им. Пьера Оже и экспериментом Telescope Array в соответствующих диапазонах энергий.
3. Определение верхней границы на поток нейтрино по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array с энергиями $E > 10^{18}$ эВ

Диссертационная работа Жежер Яны Валерьевны состоит из трех глав, заключения, двух приложений, списка сокращений и списка литературы из 203 наименований.

Во введении дается краткий обзор истории изучения космических лучей, современных экспериментов, текущего статуса вопроса. Отдельно обсуждаются два эксперимента «Обсерватория им. Пьера Оже» и Telescope Array. Автор в своей работе анализирует данные этих экспериментов.

В **первой главе** исследуется массовый состав космических лучей ультравысоких энергий по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array. Автором разработан метод определения логарифма от атомной массы частиц космических лучей, основанный на методе машинного обучения - дереве решений (boosted decision tree). Автор использовала многомерный подход, максимально чувствительный к изучаемым переменным.

По результатам анализа вычислены значения средней атомной массы $\langle \ln A \rangle$ как функция энергии. Полученный результат в пределах ошибок не зависит от энергии, среднее значение $\langle \ln A \rangle$ при этом составляет $\langle \ln A \rangle = 2.0 \pm 0.1(\text{stat.}) \pm 0.44(\text{syst.})$.

Вторая глава посвящена определению доли протонов по отношению к гелию в космических лучах ультравысоких энергий с использованием распределения максимальной глубины развития ливня. Для этого был использован подход, основанный на определении параметра Λ , получаемой при аппроксимации “хвоста” распределения X_{max} экспоненциальной функцией $\exp(-X_{\text{max}}/\Lambda)$. На основе данных экспериментов «Обсерватория им. Пьера Оже» и Telescope Array, автор заключает, что данные указывают на небольшие возможные примеси гелия в космических лучах.

Автор также рассматривает полученные результаты как доказательство безопасности будущих коллайдеров относительно рождения стабильных черных дыр.

В **третьей главе** исследуются ограничения на возможный поток нейтрино с энергиями выше $E > 10^{18}$ эВ. В результате использования метода машинного обучения - дерева решений, автор заключает об отсутствии в составе космических лучей эксперимента Telescope Array нейтрино с такими энергиями. В результате было установлено ограничение на поток нейтрино. Полученное ограничение более слабое по сравнению с данными других экспериментов IceCube, HiRES, «Обсерватория им. Пьера Оже», RICE.

В заключении кратко резюмируются **основные полученные результаты**.

1. Построен метод анализа состава первичных частиц КЛУВЭ для данных наземной решетки эксперимента Telescope Array на основе усиленных деревьев решений.
2. Получена зависимость средней массы первичных частиц КЛУВЭ по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array в диапазоне энергий $10^{18.0} - 10^{20.0}$ эВ: среднее значение атомной массы составляет $\langle \ln A \rangle = 2.0 \pm 0.1(\text{stat.}) \pm 0.44(\text{syst.})$.
3. Определено отношение доли протонов к гелию в потоке космических лучей с использованием данных обсерватории им. Пьера Оже и эксперимента Telescope Array: $p/\text{He} > 7.3$ и $p/\text{He} > 0.43$ в диапазонах энергий $10^{18.0} < E < 10^{18.5}$ эВ и $10^{18.3} < E < 10^{19.3}$ эВ, соответственно.
4. Созданы наборы модельных Монте-Карло событий наземной решетки эксперимента Telescope Array, вызванных первичными нейтрино и сильно наклонных событий, вызванных первичными протонами.
5. Получен верхний предел на поток нейтрино ультравысоких энергий по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array, $E F_{\nu} < 1.58 \times 10^{-6}$ ГэВ $\text{cm}^{-2} \text{c}^{-1} \text{sr}^{-1}$.

Приложение А посвящено более подробному описанию процедуры реконструкции событий наземной решетки эксперимента Telescope Array, результаты которой в дальнейшем используются для получения значения наблюдаемых, чувствительных к составу первичных частиц.

В **Приложении Б** описан принцип работы методов машинного обучения, основанных на усиленных деревьях решений, которые лежат в основе методов классификации событий, используемых в главе 1 и главе 3.

Научная новизна

1. Впервые исследован массовый состав КЛУВЭ с использованием исключительно данных наземной решетки эксперимента Telescope Array;
2. Впервые получен нижний предел на долю протонов по отношению к гелию с использованием “хвоста” распределения глубины максимума развития ливня;
3. Впервые в эксперименте Telescope Array получен верхний предел на поток нейтрино ультравысоких энергий.

Практическая значимость

1. Полученные результаты могут применяться в изучении механизмов рождения, ускорения и распространения КЛУВЭ;
2. Полученные результаты могут использоваться для поиска фотонов, нейтрино и анализа массового состава в будущих крупномасштабных экспериментах по изучению КЛУВЭ;
3. Полученные результаты необходимы для гарантий безопасности будущих 100 ТэВ-коллайдеров;
4. Полученные результаты поиска нейтрино ультравысоких энергий в свою очередь могут использоваться для исследования массового состава КЛУВЭ.

Основные публикации по теме диссертационной работы

По материалам диссертационной работы опубликовано 6 работ в рецензируемых научных журналах, соответствующих требованиям ВАК к публикации диссертации, из которых две в высокорейтинговых журналах первого квартиля.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были доложены на российских и международных семинарах и конференциях.

Личный вклад

Все результаты, выносимые на защиту, получены лично автором или при его непосредственном участии.

К работе имеются некоторые **замечания**.

Несмотря на то, что работа написана хорошим языком, иногда текст страдает жаргонами, а также

терминами — калькой с английского. Статистическая значимость полученных результатов недостаточно высокая, чтобы говорить о действительно принципиально новых полученных результатах.

Данные замечания не умаляют большой проделанной работы с серьезной методической составляющей. Полученные результаты, их изложение, владение материалом свидетельствуют о высоком научном уровне автора. Разработанные методы применяются впервые к данным наземной решетки эксперимента по регистрации ШАЛ, поэтому следует ожидать, что их развитие может позволить достигнуть рекордной точности.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК Российской Федерации. Результаты работы представляют интерес для ряда лабораторий и центров, в нашей стране - ОИЯИ (Дубна), ИЯИ РАН (Москва), НИЦ «Курчатовский институт» (Москва), НИЦ КИ ПИЯФ (С.-Петербург), НИЦ КИ ИТЭФ (Москва) и НИЦ КИ ИФВЭ (Протвино).

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа полностью отвечает всем требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а сам диссертант, Жежер Яна Валерьевна, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

24.04.2019

Официальный оппонент,
Заместитель директора ЛЯП ОИЯИ по научной работе,
доктор физико-математических наук

Д.В. Наумов

Подпись Д.В. Наумова заверяю:
Ученый секретарь ОИЯИ,
доктор физико-математических наук

А.С. Сорин

Дмитрий Вадимович Наумов, доктор физико-математических наук, заместитель директора ЛЯП ОИЯИ по научной работе.

Адрес: 141980 Московская область, г. Дубна, ул. Жоли-Кюри 6, ОИЯИ.
телефон: +7(49621)65912; e-mail: dnaumov@jinr.ru

Наумов Дмитрий Вадимович

Доктор наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Заместитель директора ЛЯП ОИЯИ по научной работе

Список основных публикаций по теме диссертации за последние 5 лет:

1. F. P. An et al. [Daya Bay Collaboration]. The Detector System of The Daya Bay Reactor Neutrino Experiment // Nucl. Instrum. Meth. A, 811, 133 (2016).
2. V. A. Bednyakov, D. V. Naumov, O. Y Smirnov. Neutrino physics and JINR // Phys.Usp., 59, no 3, 225-253, (2016).
3. G. Abdellaoui et al. Cosmic ray oriented performance studies for the JEM-EUSO first level trigger // Nucl. Instrum. Meth. A, 866, 150 (2017).
4. F. P. An et al. [Daya Bay Collaboration]. Measurement of electron antineutrino oscillation based on 1230 days of operation of the Daya Bay experiment // Phys.Rev. D 95, 072006 (2017).
5. F. P. An et al. [Daya Bay Collaboration]. Seasonal Variation of the Underground Cosmic Muon Flux Observed at Daya Bay // JCAP, 1801, no. 01, 001 (2018).